

Jánosi Imre

**ATMOSZFÉRIKUS PARAMÉTEREK  
STATISZTIKUS FIZIKAI VIZSGÁLATA  
ÉS LABORATÓRIUMI MODELLEZÉSE**

**MTA doktori értekezés tézisei**

ELTE TTK  
2007.

**A kutatások előzménye**

Az időjárás és egyéb környezeti paraméterek előrejelzési pontosságának állandó javítása az utóbbi évtizedekben ugrásszerű fejlődést eredményezett a távérzékelés területén (Campbell, 2006). Szerencsére az utóbbi időben kedvező irányban változik a mérési adatokhoz való hozzáférés lehetősége is. Az automatizált földi és műholdas adatgyűjtés olyan mennyiségben „termeli” az információt, amely általában messze meghaladja az „adatgazdák” feldolgozási képességét, ezért egyre több adatbank nyílik meg egyszerű internetes hozzáféréssel.

A globális éghajlatváltozással kapcsolatos egyik döntő kérdés az emberi tevékenység esetleges hatásainak feltárása. Minthogy a csatolt óceáni-légköri folyamatok komplexitása rendkívüli mértékben nehezíti a részletek tudományos szintű megértését, a kézenfekvő megközelítés első lépése a globális klíma természetes változékonyságának vizsgálata lehet. Még az olyan egyszerűnek tűnő változó, mint pl. a különböző időszakokra és földrajzi területekre meghatározott átlaghőmérséklet is időben meglehetősen komplex viselkedést tükröz: lassú determinisztikus (vagy annak tűnő) trendek mellett erős véletlenszerű ingadozások lépnek fel minden időskálán (Huybers and Curry, 2006). A globálisan csatolt atmoszféra-óceán numerikus modellek mostanában érik el azt a felbontást, amely lehetővé teszi a nagyfrekvenciás (akár napi gyakoriságú) észlelésekkel való összehasonlítást (Pierce, 2004). A légkör viselkedésének minél pontosabb reprodukciója alapvető fontosságú abból a szempontból is, hogy mennyire hihetünk a klíma hosszú távú változását előrejelző számításoknak. A reprodukciós vizsgálatokhoz a mért adatok lehető legteljesebb statisztikai jellemzése szükséges, kapcsolódó munkáinkban ehhez szeretnénk hozzájárulni.

A napi hőmérsékleti adatokon végzett kiterjedt vizsgálatainkat alapvetően két tényező motiválta. Koscielny-Bunde és munkatársai (1998) megjelent cikkükben mindössze 14 meteorológiai állomás hőmérsékleti adatasorainak elemzése alapján arra a következtetésre

jutottak, hogy a fluktuációk korrelációs tulajdonságai hatványfüggvényekkel jellemezhetők, és az exponens értéke univerzális. A meteorológiai paraméterek hosszú távú korreláltságára vonatkozó megállapításuk ugyan nem volt előzmények nélküli (pl. hasonló viselkedést talált spektrális módszerekkel Pelletier, 1997), de az kétségtelen tény, hogy korábban az irodalomban teljesen egyeduralkodó szerepet játszottak a lineáris (véges memóriájú) ARIMA modellek különböző változatai (von Storch és Zwiers, 1999).

A másik motiváló tényező egy mindmáig le nem zárt polémia a klimatikus vizsgálatok fő eszközének tekinthető globális csatolt óceán-atmoszféra numerikus modellek reprodukciós képességeiről. Govindan és munkatársai (2002) 7 vezető numerikus modell segítségével szimulálták a napi maximum hőmérsékletek alakulását 6 földrajzi helyen, majd az ebből képzett havi átlagok korrelációs tulajdonságait hasonlították össze mérési adatokkal. Arra a következtetésre jutottak, hogy a modellek nem képesek a mérési adatok tulajdonságait reprodukálni sem konstans, sem változó széndioxid koncentráció mellett. Ezzel ellentétes eredményre jutott Fraedrich és Blender (2003), szimulációs adataikat majdnem globális tengerfelszíni és kontinentális mért hőmérsékleti adatokkal összehasonlítva. Munkájukban felhívták a figyelmet az óceáni és légköri rétegek megfelelő csatolásának fontosságára, egyben utalva a hosszú távú memória lehetséges fizikai magyarázatára. Bárhogy is alakuljon ez a vita, egy szempont lényeges marad: a reprodukciós képességek vizsgálatához a lehető legjobb minőségű és lefedettségű referencia adatok szükségesek.

A Déli-sark feletti ózonlyuk 1985-ös felfedezése, és az emberi tevékenységgel való kapcsolata egy szélesebb érdeklődés középpontjába állította a légköri ózonra vonatkozó kutatásokat (WMO, 2007). Az ózon koncentráció időbeli változásait tükröző korrelációs tulajdonságok több szempontból is érdekesek. Először is, mind a földi, mind a műholdas mérések a teljes légkörre vett integrált koncentrációt számszerűsítik, időbeli változékonysága

azonban főleg az alsó sztratoszféra (20-25 km) folyamatait tükrözi, ahol előfordulása messze a leggyakoribb. Az ózon jel is hosszú távú korreláltságot mutat, hasonlóan a hőmérsékleti idősorokhoz. Döntő különbségnek tűnhet, hogy az ózon komplikált kémiai folyamatokban keletkezik és bomlik fel, kérdés, hogy ez tükröződik-e a korrelációs tulajdonságokban.

Az elmúlt három évtizedben a világ népessége szinte pontosan a duplájára nőtt (<http://esa.un.org/unpp/>). Annak ellenére, hogy ezt a kettőzödést lényegében a kevésbé fejlett gazdaságú országok produkálták, tény, hogy az energiafogyasztás ennél nagyobb mértékben bővült. A jelenlegi globális energiamérleg alapján talán nem túlzás “olaj civilizációról” beszélni: ma a világ energiaszükségletének nagyjából 40 %-át fedezi az összes, nem olaj vagy gáz alapú forrás (szén, atommaghasadás, biomassza, víz, közvetett vagy közvetlen napenergia, és a föld belső hője). A szélerőművi villamosenergia termelés a megújuló forrásokat kiaknázó technológiákon belül a leggyorsabban növekvő ágazat. 2000 és 2006 között a telepített kapacitások több mint négyszeresére nőttek, megközelítve globálisan a 75 GW-os szintet. A vezető országokban csak 2006-ban 15 GW volt a növekmény, és a tendencia az EU és az egyes kormányok támogatási politikája miatt töretlenül növekvő. Az előző évtizedekben komoly tudás halmozódott fel a szélenergia integrálásával kapcsolatban, az összkép azonban nem teljesen egyértelmű (Hau, 2005). A mérések szerint még egy több tucat generátorból álló, optimális széljárású helyen felépített erőmű átlagos teljesítménye sem haladja meg a névérték ötödét, ami jelentős beruházási többletköltséggel jár. Ráadásul a hagyományos elektromos elosztó hálózatokat stabil üzemű erőművekre tervezték, ezért sok helyen komoly gondot jelent a szélturbinákhoz hasonló, erősen ingadozó források integrálása.

A környezeti áramlások területén több olyan jelenség is különleges hangsúlyt kap, amely a hagyományos laboratóriumi hidrodinamikában általában elhanyagolhatóan csekély szerepet játszik. Az egyik ilyen jelenség a közegek változó sűrűségéből adódó

rétegzettség, ami a légkörben az összenyomhatóság, az óceánokban a lefelé növekvő sókoncentráció és csökkenő hőmérséklet következménye. Másik különlegesség az, hogy a Föld forgó mozgása miatt a tehetetlenségi erők, elsősorban a Coriolis-erő jelenléte meghatározó. Az új vonásokból adódóan a geofizikai folyadékdinamika elmélete a hagyományos hidrodinamikánál többrétűbb, összetettebb, ennek ellenére igen sikeres. Első meggondolásra nem nyilvánvaló, hogy a környezeti áramlások kísérleti modellezése lehetséges laboratóriumban. Az áramlások hasonlósági törvényein alapuló részletes elemzés azt mutatja, hogy a forgást és a rétegzettséget jellemző dimenziótlan számok - az ún. Rossby-szám és a Froude-szám - tipikus értékei laboratóriumban is megvalósíthatóak, és a jelenségek modellezése forgókádák és függőleges sűrűség-gradiensű közegek (pl. egyszerű sós víz) segítségével véghezvihető (Cushman-Roisin, 1994). 1998-ban az ELTE TTK Fizikus Tanszékcsoport (jelenleg Fizikai Intézet) javaslatunkra létrehozta a Kármán Tódorról elnevezett Környezeti Áramlások Hallgatói Laboratóriumot. A laboratórium folyamatos fejlesztés alatt áll, már több diplomamunka és OTDK-n díjazott diákköri dolgozat is született kísérleti munkákból.

## Célkitűzések

A néhány éve elkezdett kutatás elsősorban nagytömegű adatok numerikus feldolgozásán alapul. Szerencsére az egyre jobb térbeli és időbeli felbontású adatbankok egy része könnyen hozzáférhető (GDCN 1.0, TOMS Ver. 8, ECMWF ERA-40), kiértékelésük csak a megfelelő számítógépes és módszertani háttér kérdése. Az előzetes munka során a kiinduló feltételeket sikerült kiépíteni, a megfelelő hardver és szoftver kapacitás rendelkezésünkre áll.

Az elkezdett és folyamatban lévő munkák alapkutatás jellegűek, az eredmények elsősorban a klimatikus viszonyok pontosabb leírásához járulhatnak hozzá. Mindemellett fontos potenciális alkalmazási terület a globális klímamodellek fejlesztése. Nagyszámú teszt utal

arra, hogy a modellekbe épített fizika pontosítása szükséges a jóslatok megbízhatóságának javításához. Az egyik ilyen fontos pont a fent említett hosszú távú korrelációk kérdése: a jelenlegi legjobb csatolt óceán-atmoszféra modellek is csak akkor képesek a mért korrelációs tulajdonságok reprodukálására, ha a melegház-gázok koncentrációja konstans, már enyhe (a környezeti méréseknek megfelelő) eltolódásuk is "szétzilálja" a szimulált meteorológiai paraméterek korreláltságát.

Élő együttműködésünk van a Jülichi ICG-I kutatóintézettel, ahol elsősorban a sztratoszférikus ózon viselkedését tanulmányozzák kísérleti és numerikus módszerekkel. Az általuk kifejlesztett CLAMS modell (Grooß és Müller, 2007) finomításához közvetlenül is hozzájárulhat az ózonkoncentrációkkal kapcsolatos elemzésünk.

A felszíni széladatok elemzésével kapcsolatos munkánk motivációja, hogy a szélenergia hasznosítása megkívánja az intermittens jelleg lehető legjobb leírását. Terveink közt szerepel annak vizsgálata is, hogyan függ a potenciálisan kinyerhető szélenergia relatív fluktuációja az összeköttetésben álló terület nagyságától. A rendelkezésünkre álló adatok nem teszik lehetővé pl. optimális turbina helyszínek kiválasztását, de koncepcionális szinten mindenképpen hozzájárulhatnak olyan alapvető kérdések tisztázásához, hogy igaz-e pl. hogy "valahol mindig fúj a szél", vagy hogy a termelt energia ingadozását "tetszőlegesen" lehet csökkenteni egy elektromos hálózatba integrált terület növelésével.

A Kármán Laborban végzett oktatási és fejlesztési munka során egyre nagyobb hangsúlyt szeretnénk fektetni kutatási projektek kivitelezésére is. A jelenlegi felszereltséggel nem versenyezhetünk a világ vezető laboratóriumaival, ezért inkább olyan ötleteket igyekszünk megvalósítani, melyek hasznos hozzájárulást jelentenek egy-egy ismert jelenségkör alaposabb megértéséhez, illetve újszerűségük miatt lehetnek érdekesek a környezeti áramlások fizikájának művelői számára.

## Irodalmi hivatkozások

- Campbell, J.B.: Introduction to Remote Sensing (4<sup>th</sup> edition, Guildford Press, New York, 2006).
- Cushman-Roisin, B.: *Introduction to Geophysical Fluid Dynamics*. (Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1994).
- Fraedrich, K., and R. Blender: Scaling of atmosphere and ocean temperature correlations in observations and climate models. *Physical Review Letters*, **90**, 108501 (2003).
- Govindan, R.B., D. Vyushin, A. Bunde, S. Brenner, S. Havlin, and H. Schellnhuber: Global climate models violate scaling of the observed atmospheric variability. *Physical Review Letters*, **89**, 028501 (2002).
- Groß, J.-U.; and R. Müller: Simulation of ozone loss in the Arctic winter 2004/05. *Geophysical Research Letters*, **34**, L05804 (2007).
- Hau, E.: *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. (2nd ed., Springer, Berlin, 2005).
- Huybers, P., and W. Curry: Links between annual, Milankovitch, and continuum temperature variability. *Nature*, **441**, 329-332 (2006).
- Koscielny-Bunde, E., A. Bunde, S. Havlin, H.E. Roman, Y. Goldreich, and H.J. Schellnhuber: Indication of universal persistence law governing atmospheric variability. *Physical Review Letters*, **81**, 729-732 (1998).
- Pelletier, J.D.: Analysis and modeling of the natural variability of climate. *Journal of Climate*, **10**, 1331-1342, (1997).
- Pierce, D.W.: Beyond the means: validating climate models with higher-order statistics. *Computing in Science and Engineering*, **6**, 22-29 (2004).
- von Storch, H., and F.W. Zwiers: *Statistical Analysis in Climate Research*. (Cambridge University Press, Cambridge, 1999).
- WMO: *Scientific assessment of ozone depletion: 2006*. Global Ozone Research and Monitoring Project-Report No. 50, (Geneva, Switzerland, 2007).

## Új tudományos eredmények

1. Egyszerű sztochasztikus modellt dolgoztunk ki hőmérsékleti fluktuációk korrelációs tulajdonságainak reprodukálására minden időskálán. A modell egy szokásos AR1 folyamat általánosítása, ahol a rövid távú erős korrelációkat leíró csatolás egy hatványfüggvény szerint korrelált zaj-taggal kiegészítve képes visszaadni az aszimptotikus skálázás empirikus menetét [1].
2. Bevezettük a “hőmérsékleti válaszfüggvény” fogalmát [1], [2], amely a hőmérsékletváltozások dinamikai tulajdonságainak újfajta leírására alkalmas. Megmutattuk, hogy a válaszfüggvény nemlineáris, ám az eltérés csak nagy hőmérsékleti kilengéseknél számottevő, valójában emiatt működik sikeresen az autoregresszív folyamatokkal történő hagyományos modellezés [2].
3. A hőmérsékleti válaszfüggvény empirikus vizsgálatával kimutattuk, hogy a legtöbb földrajzi helyen a hőmérsékletek változásai aszimmetrikus statisztikai tulajdonságokat mutatnak, és ez a szárazföldek felett szisztematikus függést mutat [2].
4. Közel száz észlelő állomás adatainak elemzésével demonstráltuk, hogy a napi hőmérsékleti szélsőértékek eltérő korrelációs tulajdonságokat mutathatnak egyazon állomás esetén is. Ennek magyarázatára egy koncepcionális modellt alkottunk, amely korrelálatlan idősor szakaszok véletlenszerű beszurása esetén hosszú tranzienseket produkál, amelyek a mérési adatok szokásos hosszát feltételezve nem különböztethetőek meg az empirikus skálázástól, majdnem tetszőleges exponens értékek előállítása mellett [3].
5. Nagy felbontású (10 perces) hőmérsékleti adatok elemzésével kísérletet tettünk arra, hogy kapcsolatot találjunk az éjszakai hűlési periódusban mérhető karakterisztikus időskála és más felszíni meteorológiai változók között [4]. Sejtésünk szerint a hűlést meghatározó alapvető tényező a légkörben található integrált vízoszlop, melyet egyik szokásosan mért paraméter sem

reprezentál kielégítően, ezért a keresett korrelációkat nem sikerült kimutatnunk.

6. Ausztráliai és magyarországi hőmérsékleti adatsorok igen alapos vizsgálatával tanulmányoztuk az aszimptotikus korrelációk mértékét meghatározó tényezőket. Az eredmények alapján nem láttuk bizonyítottnak a korábban felvetett „univerzális fluktuációkról” szóló hipotézist [5]. Néhány állomás esetén sikerült azonosítanunk a kvázi-kétéves troposzférikus oszcillációk jelenlétét [5].
7. Az előző analízis kiterjesztésével közel globális jellemzést adtunk a hőmérsékleti fluktuációk korrelációs tulajdonságainak földrajzi függésére. Megmutattuk, hogy a DFA görbék kezdő és aszimptotikus meredekségei között nincsen szoros kapcsolat, ami a különböző időskálakon jellemző eltérő fizikai folyamatok feltételezésével magyarázható [6].
8. A hőmérsékleti anomáliák volatilitásának DFA analízise alapján kimutattuk, hogy a legtöbb földrajzi helyen magasabb rendű (nemlineáris) korrelációk jelenléte feltételezhető [7].
9. A TOMS adatbázis aeroszol adatainak vizsgálata alapvető kalibrációs hibára mutatott rá az Earth Probe műhold műszerének esetén. Bár a spektrométer optikai degradációja a berendezés üzemidejének második felében több jel alapján világossá vált, eredményeink sokkal korábbi meghibásodást jeleztek [8].
10. Felszíni ózon mérések kiértékelésének módszertani analízise arra mutatott rá, hogy az ígéretes új eljárásként elkönyvelt “empirikus módusfüggvény dekompozíció” rendkívül érzékeny az adatsorokban meglévő hiányokra illetve zajra. A módusfüggvények nem reprezentálnak valódi fizikai jelkomponenst, de alkalmasak pl. kváziperiodicitás detektálására [9].
11. A TOMS adatbázis ózon jeleinek DFA eljárással történő kiértékelése arra utal, hogy az ózon koncentrációk időbeli fluktuációit és korrelációs tulajdonságait alapvetően a globális légköri áramlási folyamatok határozzák meg, ebből a

szempontból az ózon a hőmérséklethez hasonlóan “passzív skalárként” viselkedik [10].

12. Felszíni szélsőségek eloszlásfüggvényeinek illesztésével arra az eredményre jutottunk, hogy Európa térségében az “általánosított gamma” eloszlás nyújtja azt a rugalmas leírást, amely három paraméterrel kielégítően jellemzi a különféle földrajzi körülményekre meghatározható hisztogramokat. Ennek segítségével átfogó becslés adható a potenciálisan termelhető elektromos energia mennyiségére és eloszlására [11].
13. Hegy mögötti belső hullámok laboratóriumi modellezésével sikerült megerősítenünk, hogy a rétegzett közegben gerjesztett hullámok amplitúdóját és hullámhosszát elsősorban a szél-mögötti lejtő meredeksége határozza meg, a szél-felőli oldal szerepe másodlagos. A lineáris modellekkel csak nagyon gyenge egyezést találtunk, pl. a két akadály mögött kialakuló hullámtér interferenciájára vonatkozó becslések egyikét sem tudtuk a kísérletekkel reprodukálni [12], [13].
14. Differenciálisan fűtött forgó edényben végzett kísérletekkel sikerült reprodukálnunk a [2]-ben meteorológiai észlelésekre azonosított hőmérsékletváltozások statisztikai aszimmetriáját. Ez erősen alátámasztja a sejtést, miszerint a meteorológiai adatokban látható mintázat a Föld forgásának a következménye, melyet helyi körülmények módosíthatnak. A klasszikus kísérleti elrendezés régi keletű feltételezések szerint reprodukálja a légköri baroklin instabilitás legfontosabb sajátosságait, eredményeink a dinamikai hasonlósági hipotézis további támogatását jelentik [14].
15. Laboratóriumban sikerült létrehozni a “lávalámpa” működő változatát, melyben kétfázisú folyadék termikus konvekciója tanulmányozható. Előzetes kísérleteink szerint a periódikus dinamikai tartományban a karakterisztikus oszcillációk frekvenciája a vertikális hőmérsékleti gradienssel hangolható, széles tartományban változtatható. Ez a fajta konvekció a Föld folyékony köpenyében zajló folyamatokkal lehet analógiában, de

a szorosabb kapcsolat igazolása további kísérleteket kíván [kézirat előkészületben].

## A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

- [1] A. Király, and I.M. Jánosi: Stochastic modeling of daily temperature fluctuations. *Physical Review E*, **65**, 051102 (2002).
- [2] I. Bartos, and I.M. Jánosi: Atmospheric response function over land: Strong asymmetries in daily temperature fluctuations. *Geophysical Research Letters*, **32**, L23820 (2005).
- [3] M. Pattantyús-Ábrahám, A. Király, and I.M. Jánosi: Nonuniversal atmospheric persistence: different scaling of daily minimum and maximum temperatures. *Physical Review E*, **69**, 021110, (2004).
- [4] M. Pattantyús-Ábrahám, and I.M. Jánosi: What determines the nocturnal cooling timescale at 2 m? *Geophysical Research Letters*, **31**, L05109 (2004).
- [5] A. Király, and I.M. Jánosi: Detrended fluctuation analysis of daily temperature records: Geographic dependence over Australia. *Meteorology and Atmospheric Physics*, **88**, 119-128 (2005).
- [6] A. Király, I. Bartos, and I.M. Jánosi: Correlation properties of daily temperature anomalies over land. *Tellus A*, **58**, 593-600 (2006).
- [7] I. Bartos, and I.M. Jánosi: Nonlinear correlations of daily temperature records over land. *Nonlinear Processes in Geophysics*, **13**, 571-576 (2006).

- [8] P. Kiss, I.M. Jánosi, and O. Torres: Early calibration problems detected in TOMS Earth-Probe aerosol signal. *Geophysical Research Letters*, **34**, L07803 (2007).
- [9] I.M. Jánosi, and R. Müller: Empirical mode decomposition and correlation properties of long daily ozone records. *Physical Review E*, **71**, 056126 (2005).
- [10] P. Kiss, R. Müller, and I.M. Jánosi: Long-range correlations of extrapolar total ozone are determined by the global atmospheric circulation. *Nonlinear Processes in Geophysics*, **14**, 435-442 (2007).
- [11] P. Kiss, and I.M. Jánosi: Comprehensive empirical analysis of ERA-40 surface wind speed distribution over Europe. *Energy Conversion and Management*, submitted (2007).
- [12] B. Gyüre, and I.M. Jánosi: Stratified flow over asymmetric and double bell-shaped obstacles. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, **37**, 155-170 (2003).
- [13] B. Gyüre, and I.M. Jánosi: Laboratory modeling of atmospheric flow phenomena: Mountain waves. *Időjárás, (Quart. J. of the Hungarian Meteorological Service)*, **110**, 299-307 (2006).
- [14] B. Gyüre, I. Bartos, and I.M. Jánosi: Nonlinear statistics of daily temperature fluctuations reproduced in a laboratory experiment. *Physical Review E*, in print (2007).